

# 第3章

## 常用传感器的工作原理

### 3.1 电阻式传感器

电阻式传感器是一种把被测参量转换为电阻变化的传感器,是目前在非电量检测技术中应用最广、最成熟和最重要的传感器之一。常用的电阻式传感器有电位器式、电阻应变式、热敏效应式等类型。本节主要介绍电阻应变式传感器。

电阻应变式传感器是一种利用电阻应变效应,由电阻应变片和弹性敏感元件组合起来的传感器。将应变片粘贴在各种弹性敏感元件上,当弹性敏感元件感受到外力、位移、加速度等参数的作用时,弹性敏感元件产生应变,再通过粘贴在上面的电阻应变片将其转换成电阻的变化。这种传感器通常主要由电阻应变片(敏感元件)、基底、引线和覆盖层等组成,核心元件是电阻应变片(敏感元件)。敏感元件的主要作用是实现应变—电阻的变换。根据敏感元件材料与结构的不同,应变片可分为金属电阻应变片和半导体应变片。

#### 3.1.1 金属电阻应变片

##### 1. 基本结构

电阻应变片种类繁多,但其基本结构大体相似,现以金属丝绕式应变片结构为例加以说明,其结构原理示意图如图 3-1 所示。

它由盖层、敏感栅、基底及引线四部分组成。敏感栅可由金属丝、金属箔制成,它是转换元件,被粘贴在基底上。用黏合剂粘贴在传感器弹性元件或试件上的应变片通过基底把应变传递到敏感栅上,同时基底起绝缘作用。盖层起绝缘保护作用。焊接于敏感栅两端的引线起到连接测量导线之用。

##### 2. 金属电阻应变片的工作原理

金属电阻应变片的工作原理是利用金属材料的电阻定律,当应变片的结构、尺寸发生变化时,其电阻也发生相应的变化。下面介绍应变片电阻变化与应变的关系。

金属导体在未受力时,其原始电阻  $R$  为:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3-1)$$

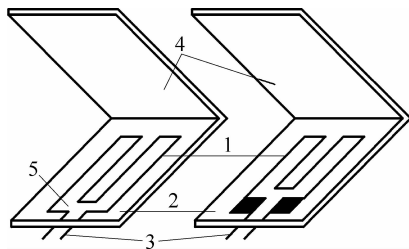


图 3-1 电阻应变式传感器的结构原理示意图

1—敏感栅; 2—基底; 3—引线;  
4—盖层; 5—黏合剂

式中,  $\rho$  为金属导线电阻率( $\Omega \cdot \text{m}$ );  $l$  为金属丝长(m);  $A$  为金属丝的横截面积( $A = \pi r^2, \text{m}^2$ );  $r$  为金属丝半径(m)。

如果对电阻丝长度作用均匀应力, 则导线电阻的相对变化为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (3-2)$$

式中,  $\frac{dl}{l} = \epsilon$  为材料的轴向应变, 令  $\frac{dr}{r} = \epsilon'$  为金属丝径向应变。由材料力学可知, 在弹性范围内, 金属丝受拉力时沿轴向伸长、沿径向缩短, 则轴向应变和径向应变的关系为:

$$\epsilon' = -\mu\epsilon$$

式中  $\mu$  为金属材料的泊松系数。

根据此关系  $\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} = -2\mu\epsilon$ , 故:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} = \left[ (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \right] \epsilon \quad (3-3)$$

式中,  $(1 + 2\mu)$  是电阻丝几何尺寸改变所引起的, 为形变效应部分;  $\frac{d\rho/\rho}{dl/l}$  是电阻丝的电阻率随应变的改变所引起的, 为压阻效应部分, 对于大多数金属电阻丝而言, 其值为常数, 通常很小, 可以忽略。该式表明材料电阻的变化是应力引起形状的变化和电阻率变化的综合结果。

### 3.1.2 半导体应变片

半导体应变片是用半导体材料, 采用与丝式应变片相同方法制成的半导体应变片, 其结构示意图如图 3-2 所示。

半导体应变片的工作原理是基于半导体材料的压阻效应。所谓压阻效应是指半导体材料当某一轴向受外力作用时, 其电阻率  $\rho$  发生变化的现象。

半导体应变片受轴向力作用时, 其电阻相对变化为:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (3-4)$$

式中,  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  为半导体应变片的电阻率相对变化, 其值与半导体敏感条在轴向所受的应变力之比为一常数, 即:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi E\epsilon_x \quad (3-5)$$

式中,  $\pi$  为半导体材料的压阻系数,  $E$  为弹性模量。

将式(3-5)代入式(3-4)中得:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \pi E)\epsilon_x \quad (3-6)$$

式中,  $(1 + 2\mu)$  项随几何形状而变化,  $\pi E$  项为压阻效应, 随电阻率而变化。实验证明,  $\pi E$  比  $(1 + 2\mu)$  大近百倍, 所以  $(1 + 2\mu)$  可忽略, 因而半导体应变片的灵敏系数为:

$$K_S = \frac{\Delta R}{R} = \pi E \quad (3-7)$$

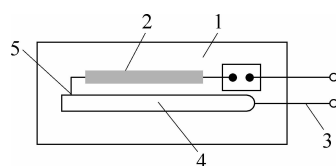


图 3-2 半导体应变片结构示意图  
1—基片; 2—半导体敏感条; 3—外引线;  
4—引线连接片; 5—内引线

半导体应变片最突出的优点是体积小,灵敏度高,频率响应范围很宽,输出幅值大,不需要放大器,可直接与记录仪连接使用,使测量系统简单。但它具有温度系数大、应变时非线性比较严重的缺点。

### 3.1.3 应变片的命名

应变片的命名方法从 1993 年 7 月 1 日开始实施,标准号为 GB/T 13992—1992,其内容如下。

- (1) 每种应变片产品命名型号,型号由汉语拼音字母和数字组成,共 7 项(如表 3-1 所示)。
- (2) 由左至右依次排列,第 I 项字母表示应变片类别。
- (3) 第 II 项字母表示应变片基底材料。
- (4) 第 III 项数字表示标称电阻值,单位为  $\Omega$ ,带括号的规格不推荐采用。
- (5) 第 IV 项数字表示应变片栅长,小于 1mm 时小数点省略。
- (6) 第 V 项由两个字母组成,表示应变片结构形状,表 3-1 中只列出常用的代表字母。
- (7) 第 VI 项数字表示应变片的极限工作温度,对常温应变片此项省略。
- (8) 第 VII 项括号内数字表示温度自补偿应变片所适用试件材料的线膨胀系数。

例如,BH350—3AA150(16)为单轴箔式环氧基底用于线膨胀系数  $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的材料、最高工作温度  $150^{\circ}\text{C}$ 、栅长 3mm 的温度自补偿应变片。

表 3-1 应变片型号命名表

| I     |    | II     |    | III                   | IV        | V               | VI                               | VII   |
|-------|----|--------|----|-----------------------|-----------|-----------------|----------------------------------|---|
| 应变片类别 |    | 基底材料种类 |    | 标准电阻值<br>( $\Omega$ ) | 应变片栅长(mm) | 敏感栅的结构形状        | 极限工作温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 适用材料的线膨胀系数<br>( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) |
| 名称    | 符号 | 名称     | 符号 |                       |           |                 |                                  |   |
| 丝绕式   | S  | 纸      | Z  | 60                    | 0.2 10    | (略)             | 例                                | 钛合金 9   |
| 短接式   | D  | 环氧类    | H  | (90)                  | 0.5 12    | 单轴              | 150                              | 低碳钢 11  |
| 箔式    | B  | 酚醛类    | F  | 120                   | 1 15      | AA              | 200                              | 合金钢 14  |
| 特殊用途  | T  | 聚酯类    | J  | (150)                 | 2 20      |                 | 250                              | 不锈钢 16  |
|       |    | 缩醛类    | X  | 200                   | 3 30      | 二轴 $90^{\circ}$ | 350                              | 铝合金 23  |
|       |    | 聚酰西胺类  | A  | (250)                 | 4 50      | BA              | 400                              | 镁合金 27  |
|       |    | 玻璃布滑胶  | B  | 350                   | 5 100     | 三轴 $45^{\circ}$ | 550                              |   |
|       |    | 金属薄片   | P  | 500                   | 6 150     | CA              | 700                              |   |
|       |    | 临时基底   | L  | (650)                 | 8 200     | 圆膜栅             | 800                              |   |
|       |    |        |    | 1000                  |           | KA              | 900                              |   |

### 3.1.4 电阻式传感器的测量电路

由于应变片的机械应变一般都很小,要把微小应变引起的微小电阻值的变化测量出来,同时要把电阻相对变化  $\frac{\Delta R}{R}$  转换为电压或电流的变化,因此需要设计专用的测量电路,常用桥式测量电路。电桥电路的主要指标是桥路灵敏度、非线性和负载特性。下面具体讨论有关电路和这几项指标。

#### 1. 直流电桥平衡条件

直流电桥的基本形式如图 3-3 所示。 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  称为电桥的桥臂, $R_L$  为其负载(可以

是测量仪表内阻或其他负载)。

当  $R_L \rightarrow \infty$  时,电桥的输出电压  $U_0$  应为:

$$U_0 = E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3-8)$$

当电桥平衡时,  $U_0 = 0$ , 由上式可得到:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

或:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (3-9)$$

式(3-9)称为电桥平衡条件。平衡电桥就是桥路中相邻两臂阻值之比应相等,这样方可使流过负载电阻的电流为0。

## 2. 电压灵敏度

如果在实际测量中使第一桥臂  $R_1$  由应变片来替代,微小应变引起微小电阻的变化,电桥则输出不平衡电压的微小变化。一般需要加入放大器放大。由于放大器的输入阻抗可以比桥路输出电阻高得多,所以此时电桥仍视为开路情况。当受应变时,若应变片电阻变化为  $\Delta R_1$ ,其他桥臂固定不变,则电桥输出电压  $U_0 \neq 0$ ,即:

$$\begin{aligned} U_0 &= E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ &= \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \\ &= \frac{\left( \frac{R_4}{R_3} \right) \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} \right)}{\left( 1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right)} E \end{aligned} \quad (3-10)$$

设桥臂比  $n = \frac{R_2}{R_1}$ , 由于  $\Delta R_1 \ll R_1$ , 分母中  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  可忽略,并考虑到起始平衡条件  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ , 由式(3-10)可得:

$$U'_0 \approx E \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-11)$$

电桥电压灵敏度定义为:

$$S_V = \frac{U'_0}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = E \frac{n}{(1+n)^2} \quad (3-12)$$

由式(3-12)可知:

(1) 电桥电压灵敏度正比于电桥供电电压,供桥电压愈高,电桥电压灵敏度愈高。但是供桥电压的提高受到应变片允许功耗的限制,所以一般供桥电压应适当选择。

(2) 电桥电压灵敏度是桥臂电阻比值  $n$  的函数,因此必须恰当地选择桥臂比  $n$  的值,以保证电桥具有较高的电压灵敏度。下面分析当供桥电压  $E$  确定后,  $n$  应取何值,电桥电压灵敏度才最高。

由  $\frac{\partial S_V}{\partial n} = 0$  来求  $S_V$  的最大值。对于式(3-12)则有:

$$\frac{\partial S_V}{\partial n} = E \frac{1-n^2}{(1+n)^4} = 0 \quad (3-13)$$

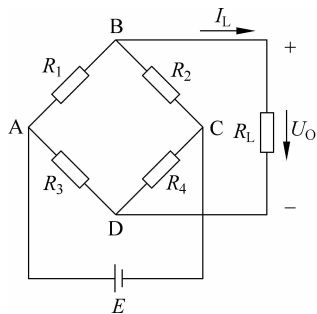


图 3-3 直流电桥

由式(3-13)可知,当  $n=l$  时,  $S_V$  为最大。也就是说,在供桥电压确定后,当  $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_4$  时,电桥的电压灵敏度最高。此时,式(3-10)、式(3-11)、式(3-12)分别简化为:

$$U_o = \frac{1}{4}E \frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1}} \quad (3-14)$$

$$U'_o \approx \frac{1}{4}E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-15)$$

$$S_V = \frac{1}{4}E \quad (3-16)$$

由式(3-14)、式(3-15)、式(3-16)可知,当电源电压  $E$  和电阻相对变化  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  一定时,电桥的输出电压及其灵敏度也是定值,且与各桥臂阻值大小无关。

### 3. 非线性误差及其补偿的方法

在上面的分析中都是假定应变片的参数变化很小,而且可忽略掉  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ ,这是一种理想情况。实际情况应按式(3-14)计算,分母中的  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  不可忽略,此时式(3-10)中的输出电压  $U_o$  与  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  的关系是非线性的。实际的非线性特性曲线与理想的线性曲线的偏差称为绝对非线性误差。下面计算非线性误差。

设在理想情况下,从式(3-14)中忽略掉了  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ ,记输出电压为  $U'_o$ ,非线性误差为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{U_o - U'_o}{U'_o} = \frac{U_o}{U'_o} - 1 = \frac{\frac{\left(\frac{R_4}{R_3}\right)\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)E}{\left[1 + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right]\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}}{\frac{\left(\frac{R_4}{R_3}\right)\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)E}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}} - 1 \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}} - 1 = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}} - 1 = \frac{-\frac{\Delta R_1}{R_1}}{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}} \end{aligned} \quad (3-17)$$

对于一般应变片来说,所受应变  $\epsilon$  通常在  $5000\mu$  以下,若取灵敏系数  $K_s=2$ ,则  $\frac{\Delta R_1}{R_1} = K_s \cdot \epsilon = 2 \times 5000 \times 10^{-6} = 0.01$ ,代入式(3-17)计算,得出非线性误差为  $0.5\%$ ,还不算大;但对电阻相对变化较大的情况,就不可忽视该误差了。例如半导体应变片,  $K_s=130$ ,当承受  $\epsilon$  为  $1000\mu$  时,  $\frac{\Delta R_1}{R_1} = K_s \cdot \epsilon = 130 \times 1000 \times 10^{-6} = 0.130$ ,代入式(3-17)计算,得到非线性误差为  $6\%$ 。所以对半导体应变片的测量电路要做特殊处理,才能减小非线性误差。

减小或消除非线性误差的方法有如下几种:

## 1) 提高桥臂比

由式(3-17)可知,提高桥臂比  $n = \frac{R_2}{R_1}$ ,非线性误差可以减小;但从电压灵敏度  $S_V \approx E \frac{1}{n}$  考虑,电桥电压灵敏度将降低。这是一种矛盾。因此,为了达到既减小非线性误差,又不降低其灵敏度,必须适当提高供桥电压  $E$ 。

## 2) 采用差动电桥

根据被测试件的受力情况,若使一个应变片受拉,另一个应变片受压,则应变符号相反;测试时,将两个应变片接入电桥的相邻臂上,如图 3-4 所示,称为半桥差动电路。该电桥输出电压  $U_0$  为:

$$U_0 = E \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

若  $\Delta R_1 = \Delta R_2$ 、 $R_1 = R_2$ 、 $R_3 = R_4$ ,则得:

$$U_0 = \frac{1}{2} E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-18)$$

由式(3-18)可知, $U_0$  与  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  成线性关系,差动电桥无非线性误差。而且电压灵敏度为  $S_V = \frac{1}{2} E$ ,比使用一个应变片提高了一倍,同时可以起到温度补偿的作用。

若将电桥四臂接入 4 个应变片,如图 3-5 所示,即两个应变片受拉,两个应变片受压,将两个应变符号相同的接入相对臂上,则构成全桥差动电路。若满足  $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ ,则输出电压为:

$$U_0 = E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-19)$$

$$S_V = E \quad (3-20)$$

由此可知,比用单片提高了 4 倍,比半桥差动电路提高了一倍。

## 3) 采用高内阻的恒流源电桥

通过电桥各臂的电流如果不恒定,也是产生非线性误差的重要原因。所以供给半导体应变电桥的电源一般采用恒流源,如图 3-6 所示。供桥电流为  $I$ ,通过各臂的电流为  $I_1$  和  $I_2$ ,若测量电路输入阻抗较高,则:

$$\begin{cases} I_1(R_1 + R_2) = I_2(R_3 + R_4) \\ I = I_1 + I_2 \end{cases} \quad (3-21)$$

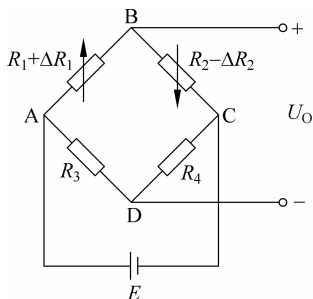


图 3-4 半桥差动电路

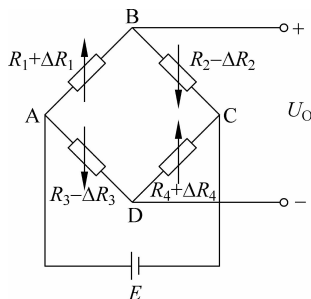


图 3-5 全桥差动电路

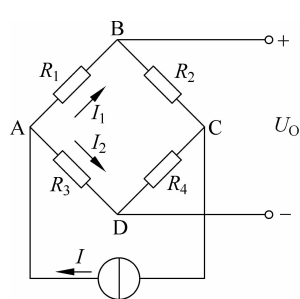


图 3-6 恒流源电桥

解该方程组得：

$$I_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I \quad (3-22)$$

$$I_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I \quad (3-23)$$

输出电压为：

$$U_O = I_1 R_1 - I_2 R_3 = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I \quad (3-24)$$

若电桥初始处于平衡状态,即  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ ,而且  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ,当第一桥臂电阻  $R_1$  变为  $(R_1 + \Delta R_1)$  时,电桥输出电压为：

$$U_O = \frac{R \cdot \Delta R}{4R + \Delta R} I = \frac{1}{4} I \cdot \Delta R \frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{4R}} \quad (3-25)$$

由式(3-25)可知,分母中的  $\Delta R$  被  $4R$  除,与式(3-19)相比较,比前面的单臂供压电桥的非线性误差减少了 50%。

### 3.1.5 电阻式传感器的应用

电阻应变式传感器由于具有测量精度高、动态响应好、使用简单和体积小等优点,因而被广泛应用于应变、压力、弯矩、扭矩、加速度和位移等物理量的测量中。电阻应变片应用可分为两大类:一类是将应变片粘贴在弹性敏感元件上,由弹性元件在被测物理量(如力、压力、加速度等)的作用下,产生一个与之成正比的应变,然后由应变片作为传感元件将应变转换为电阻变化,通过测量电路检测出被测物理量,这样就可以组成各种专用的应变式传感器,在目前的传感器中,尤其是在称重测力传感器中占有重要的地位;另一类是直接将应变片粘贴在被测构件上,然后将其接到应变仪上就可以直接从应变仪上读到相应的应变值,例如电阻应变仪就是这类应用的一个例子。注意应在弹性元件或被测构件应变最大的部位粘贴应变片。

#### 1. 柱(筒)式力传感器

柱式力传感器的弹性元件为实心柱,筒式力传感器的弹性元件为空心柱。应变片粘贴在弹性体外壁应力分布均匀的中间部分,对称地粘贴多片。弹性元件上的应变片的粘贴和桥路的连接应尽可能地消除载荷偏心和弯矩的影响, $R_1$  和  $R_3$  串联, $R_2$  和  $R_4$  串联,并置于桥路相对桥臂上以减小弯曲影响,横向贴片做温度补偿用,如图 3-7 所示。

**【例 3-1】** 电阻应变片阻值为  $120\Omega$ ,灵敏系数  $K=2$ ,沿纵向粘贴于直径为  $0.05\text{m}$  的圆形钢柱表面;钢材的  $E=2 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ , $\mu=0.3$ 。求钢柱受  $10\text{t}$ (吨)拉力作用时,应变片电阻的变化量  $\Delta R$  和相对变化量  $\frac{\Delta R}{R}$ ;又若应变片沿钢柱圆周方向粘贴,受同样拉力作用时,应变片电阻的相对变化量为多少?

解:因为  $\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon_x$ ,且  $\epsilon_x = \frac{F}{SE}$ ,所以有:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = K \frac{F}{\pi r^2 E} = \frac{2 \times 10 \times 10^3 \times 9.8}{3.14 \times \left(\frac{0.05}{2}\right)^2 \times 2 \times 10^{11}} = 0.05\%$$

$$\Delta R = 0.05\% R_x = 120 \times 0.05\% = 0.06(\Omega)$$

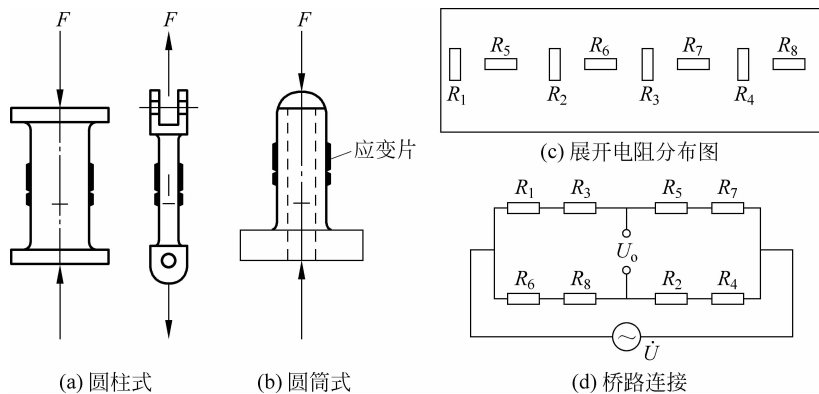


图 3-7 柱(筒)式力传感器示意图

$$\frac{\Delta R_y}{R_y} = k_s \epsilon_y = -k_s \mu \epsilon_x = -0.3 \times \frac{0.05\%}{2} \times 2 = -0.015\%$$

## 2. 环式力传感器

环式力传感器的结构和应力分布示意图如图 3-8 所示。与柱式相比,它的应力分布更复杂,变化更大,且有方向上的区分。由应力分布图可见,C 位补偿置应变片的应变为 0,即它起温度补偿作用。A、B 两点处如果内、外均贴上应变片,则其所在位置的应变量为:

$$\epsilon_A = \pm \frac{3F[R - (h/2)]}{bh^2 E} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right), \quad \epsilon_B = \pm \frac{3F[R - (h/2)]2}{bh^2 E} \left(\frac{2}{\pi}\right)$$

式中,  $h$  为圆环厚度;  $b$  为圆环的宽度;  $E$  为材料弹性模量;  $F$  为载荷。

在图 3-8 所示方向的拉力作用下,内贴片取“+”,外贴片取“-”。对于  $\frac{R}{h} > 5$  的小曲率圆环可以忽略式中的  $h/2$ 。只要测出 A、B 两处的应变,就可以通过上式确定载荷  $F$  的大小。即

实际测量时利用了以下变量间的传递关系:  $\xrightarrow{\text{测量}} U_0 \xrightarrow{U_0 = f\left(\frac{\Delta R}{R}\right)} \frac{\Delta R}{R} = K_U \epsilon \xrightarrow{\epsilon = f(F)} F$ 。

## 3. 悬臂梁式力传感器

图 3-9 所示为一种悬臂梁式力传感器示意图,图中  $R_1$  为电阻应变片,将其粘贴在一端固定的悬臂梁(等强度梁)上,另一端的三角形顶点上如果受到载荷  $F$  作用,梁内各断面产生的应力是相等的,表面上的应变也是相等的,与水平方向的贴片位置无关。载荷将导致悬臂发生

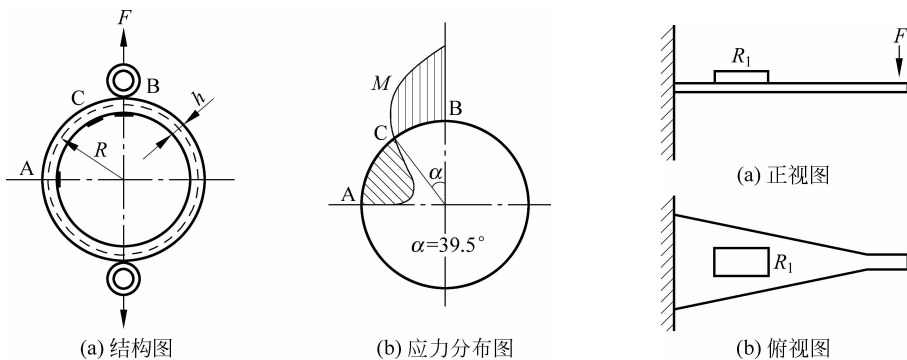


图 3-8 环式力传感器结构和应力分布示意图

图 3-9 悬臂梁式力传感器示意图

形变,该形变将传递给与之相连的应变片,应变片产生相同的形变,从而使得其电阻值发生变化。将该电阻应变片接入测量电桥,根据电桥输出电压的变化即可实现对载荷  $F$  的测量。

#### 4. 电阻式压力传感器

电阻式压力传感器主要用于测量流动介质(如液体、气体)的动态或静态压力。这类传感器大多采用膜片式或筒式弹性元件。图 3-10 所示为膜片式压力传感器示意图,应变片贴于膜片内壁,在压力  $P$  作用下,膜片产生径向应变和切向应变,其大小分别为:

$$\epsilon_r = \frac{3P(1-\mu^2)(R^2-3x^2)}{8h^2E}, \quad \epsilon_t = \frac{3P(1-\mu^2)(R^2-x^2)}{8h^2E}$$

式中, $R$ 、 $h$  为膜的半径和厚度; $x$  为离圆心的径向距离; $P$  为膜片上均匀分布的压力; $\mu$  为材料的泊松比; $E$  为材料弹性模量。由该式可得以下结论:

$$(1) x=0, \text{即在膜片中心位置时的应变为 } \epsilon_r = \epsilon_t = \frac{3P(1-\mu^2)R^2}{8h^2E}。$$

(2)  $x=R$ ,即在膜片边缘位置时的应变为  $\epsilon_r = -\frac{3P(1-\mu^2)R^2}{4h^2E}$ 、 $\epsilon_t = 0$ ,即径向应变的绝对值比中心处的高一倍。

$$(3) x = \frac{R}{\sqrt{3}}, \epsilon_r = 0。$$

由图 3-10 可知,切向应变始终为非负值,中心处最大;而径向应变有正有负,在中心处和切向应变相等,在边缘处最大,是中心处的两倍;在  $x = \frac{R}{\sqrt{3}}$  处径向应变为 0,贴片时要避开此处,因为不能感受切向应变,且反映不出径向应变的最大或最小特征。根据以上特征,一般在膜片圆心处沿切向贴两片( $R_1$ 、 $R_4$ )感受  $\epsilon_t$ ,因为圆心处切向应变最大;在边缘处沿径向贴两片( $R_2$ 、 $R_3$ )感受  $\epsilon_r$ ,因为边缘处径向应变最大;然后接成全桥测量电路,以提高灵敏度和实现温度补偿。

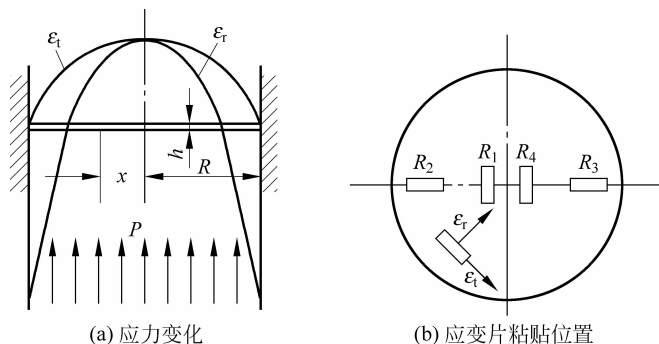


图 3-10 膜片式压力传感器示意图

#### 5. 电阻式液体重量传感器

图 3-11 所示为一种电阻式液体重量传感器示意图,用于插入式测量容器内液体的重量。该传感器有一根传压杆,上端安装微压传感器,下端安装感压膜,它用于感受液体的压力。当容器中溶液增多时,感压膜感受的压力就增大。将传感器接入电桥的一个桥臂,则输出电压为

$$U_o = Sh\rho g$$

式中, $S$  为传感器的传输系数; $\rho$  为液体密度; $g$  为重力加速度; $h$  为位于感压膜上的液体高度。对于等截面的柱形容器,有:

$$h\rho g = \frac{Q}{A}$$

式中,  $Q$  为容器内感压膜上方液体的重量;  $A$  为柱形容器的截面积。

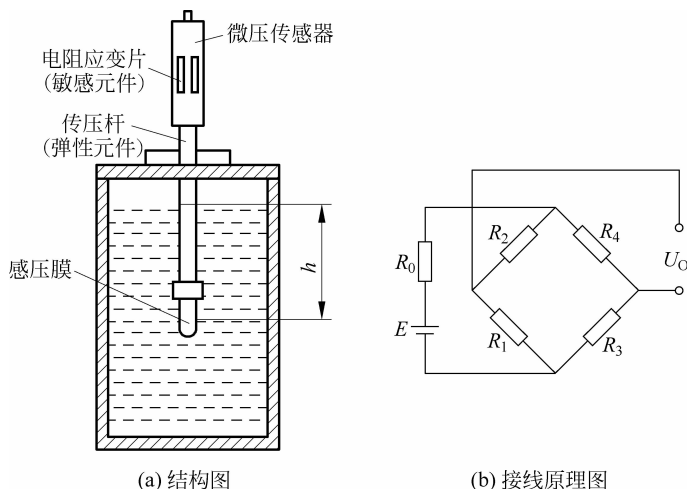


图 3-11 电阻式液体重量传感器示意图

由此可得容器内感压膜上方液体的重量与电桥输出电压间的关系为:

$$U_0 = \frac{SQ}{A}$$

此式表明,电桥输出电压与柱形容器内感压膜上方液体的重量成正比。在已知液体密度的条件下,这种方式还可以实现容器内的液位高度测量。

## 3.2 电容式传感器

电容式传感器是利用将非电量的变化转换为电容量的变化来实现对物理量的测量。电容式传感器具有结构简单、体积小、分辨率高、动态响应好、温度稳定性好、电容量小(一般为几十到几百  $\mu\text{F}$ )、负载能力差、易受外界干扰产生不稳定现象等特点。电容式传感器已广泛应用于位移、振动、角度、加速度、压力、差压、液面(料位)、成分含量等方面的测量。

### 3.2.1 电容式传感器的工作原理和结构

以平板式电容器为例(如图 3-12 所示),它主要由两个金属极板、中间夹一层电介质构成。若在两极板间加上电压,电极上就存储有电荷,所以电容器实际上是一种存储电场能的元件。平板式电容器在忽略其边缘效应时的电容量可用下式表示:

$$C = \frac{\epsilon S}{l} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{l} \quad (3-26)$$

式中,  $S$  为电容器两极板遮盖面积 ( $\text{m}^2$ );  $\epsilon$  为介质的介电常数 ( $\text{F/m}$ );  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数;  $\epsilon_0$  为真空的介电常数 ( $8.85 \times 10^{-2} \text{F/m}$ );  $l$  为极板间距离 ( $\text{m}$ )。

由式(3-26)可知,若 3 个变量中任意两个为常数而改变另外一

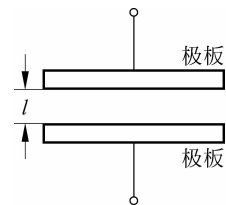


图 3-12 平板式电容器